

Mikroalg Üretimi İçin Fotobiyoreaktör Tasarımları

Hilal Kargın Yılmaz

ME.Ü. Su Ürünleri Fakültesi Yenişehir Kampüsü C-Blok, Mersin, Türkiye.

*E mail:

Abstract: *The Designs of Photobioreactors for Microalgae Production.* Commercial microalgae production is a branch of industry, which has a strong base. Recently, in the production of commercial microalgae, the different designs of closed photobioreactors providing new species and the commercial production of these have shown a great improvement. These designs seem to be prevalent in commerce in the near future. Tubular photobioreactors designed according to the closed systems were made in different shapes, various size and length of transparent pipes or tubes. In these type bioreactors, the appropriate diameter of the tube is from 2 to 4 cm. Although the success of open systems in the *Spirulina* and *Dunaliella* microalgae mass cultures which are cultured in a distinct growth environment, production of microalgae species like *Haemotococcus* and *Phaeodactylum* which used in commerce and have no distinct environment conditions is more successful in the closed systems. However, the high production costs of these systems have prevented the commercial application until recent years. The basic principle of the designs for the smooth flat reactor and tubular photobioreactor is to get use of light more productive by cultured cells. Thus it is been possible to arrive greater biomass density by providing appropriate stirring which remove accumulation of harmful gases from culture systems and by getting use of light more productive by cultured cells. As a conclusion, these systems are suitable to work for the continuous production. In the maximum continuous density depending on the production of algae and the active usage of growing environment conditions, it provides the chance to distribute the production in advance. Therefore, the total cost decreases and a need for smaller areas. The aim is to decrease the cost by reducing the construction costs of these systems.

Key Words: Microalgae production, photobioreactor design, tubular photobioreactor, flat plate photobioreactor.

Özet: Ticari mikroalg üretimi, sağlam temellere dayanan bir endüstri dalıdır. Son yıllarda ticari mikroalglerin üretiminde yeni türler ve bu türlerin ticari üretimini temin edecek kapalı fotobiyoreaktörlerin farklı tasarımları önemli gelişme göstermiştir. Bu tasarımların yakın gelecekte ticari açıdan ön planda olacağı görülmektedir. Kapalı sistemler içerisinde bulunan tübüler fotobiyoreaktörler, değişik şekillerde, farklı büyüklük ve uzunluktaki şeffaf borulardan veya hortumlardan meydana gelmektedir. Bu tip biyoreaktörlerde, uygun tüp çapı 2 – 4 cm arasındır. *Spirulina* ve *Dunaliella* gibi seçici bir büyüme ortamında kültür edilen mikroalg yığın kültürlerinde açık sistemlerin başarısına rağmen, *Haemotococcus* ve *Phaeodactylum* gibi ticari anlamda kullanılan fakat seçici ortam koşullarına sahip olmayan mikroalg türlerinin kapalı sistemlerde üretimi daha başarılı olmaktadır. Ancak bu sistemlerin yüksek üretim maliyeti son zamanlara kadar ticari uygulamasını engellemiştir. Düz panel reaktör ve tübüler fotobiyoreaktör tasarımlarının temel ilkesi; kültüre edilen hücreler tarafından ışıktan daha verimli yararlanılmasını sağlamaktır. Böylece, zararlı gazların birikimini kültür sistemlerinden uzaklaştıran uygun bir karıştırma ve hücrelerin ışıktan daha verimli yararlanmasını sağlayarak, daha yüksek biyomas yoğunluklarına ulaşmak mümkün olmaktadır. Sonuç olarak, bu sistemler sürekli üretimde çalışmaya uygundur. Sürekli maksimum yoğunlukta alg üretimi ve büyüme ortam koşullarının etkin kullanımına bağlı olarak, üretimi önceden tayin etme şansını sağlar. Böylece toplam maliyet düşer ve daha küçük alanlara ihtiyaç duyulur.

Anahtar Kelimeler: Mikroalg üretimi, fotobiyoreaktör tasarımı, tübüler fotobiyoreaktör, düz-yassı levha fotobiyoreaktör.

Giriş

Basit yapılı, tek hücreli mikroalglerin birçoğu gıda sektöründe değerlendirilir ve içerdikleri pigment maddeleri, antibiyotikler, vitaminler nedeniyle de tıp, eczacılık alanlarında ve kozmetik ürünlerinde katkı maddesi olarak kullanılırlar. Aynı zamanda insan ve hayvan gıdası olarak değerlendirilirler. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde besin kaynağı olarak tüketilirler. Mikroalgler, diğer bir alternatif olarak tarım alanlarında organik gübre olarak değerlendirilir. Aşırı avlanma ve dünya balık stoklarının bilinçsizce kullanımı ticari öneme sahip kabuklu deniz canlılarının üretiminde yani akuakültür çalışmalarında önemli artışların meydana gelmesine neden olmuştur. Bu sanayinin genelde büyümesi etkin alg üretim sistemlerinin yetersiz olması nedeniyle de yavaşlamıştır. Tek hücreli mikroalg, ticari öneme sahip birçok su canlısının, özellikle

balıkların larva aşamasında önemli besin kaynağı ve rotiferin beslenmesinde kullanılan değerli bir canlı besindir. Çünkü mikroalgler sucul sistemlerin ilk biyolojik CO₂/O₂ dönüştürücüleri, biokütlein en önemli üreticisidir. Mikroalgler, biyoteknolojinin gelecekteki en önemli kaynağıdır (Borowitzka 1992, Tsoglin ve Gabel 2000, Pulz 2001). Bu hususlar göz önüne alındığında mikroalg üretiminde güvenli, uygun bir üretim sisteminin seçilmesi gerekmektedir. Mikroalg üretimi için önemli temel hususlar; ışık ya da güneş enerjisi, su, karbondioksit ve inorganik zenginleştirici maddelerdir. Bu ihtiyaçlar temin edildiğinde alglerin yoğun miktarlarda üretimi de mümkün olmaktadır.

Mikroalg kültürü modern biyoteknolojilerden biridir. İlk kez tek hücreli alglerden *Chlorella vulgaris* Beijerinck (1890) tarafından üretimi gerçekleştirilmiştir. Bitki fizyolojisini detaylı incelemek için tek hücreli alg kültürleri kullanımı Warburg

tarafından geliştirilmiştir (Warburg 1919). Mikroalg yığın kültürü 1948'den sonra (ABD) Stanford'da, Almanya ve Tokyo'da araştırmaların odak noktası olmaya başlamıştır. Ticari mikroalglerin üretimi 1960'ların başlarında Japonya'da *Chlorella* kültürü ile başlamış Tsukada ve diğ. (1977), 1970'lerin başında Soso Texcoco S.A Durand-chastel (1980) tarafından Meksiko, Lake Texcoco 'da *Spirulina* üretim ve kültür tesisinin kurulmasıyla devam etmiştir. 1977'de Tayland'da *Spirulina* tesisi kurulmuştur ve 1980'e kadar Asya da ayda 1000 kg' dan fazla mikroalg üretim kapasiteli (özellikle *Chlorella*) büyük çaplı bir tesis kurulmuştur. Kawaguchi (1980) 1996'dan 2000'e kadar *Chlorella*'nın Japonya da ticareti yapılmıştır. Lee (1997)'de Avustralya da Western Biotechnology Ltd. ve Betatene Ltd. tarafından üretim tesisleri kurulduktan sonra –karoten kaynağı olan *Dunaliella salina*'nın ticari üretiminde 3. büyük mikroalg endüstrisi haline gelmiştir. Bunları daha sonra İsrail ve ABD'deki diğer ticari tesisler takip etmiştir. Bu algler gibi siyanobakterinin (mavi-yeşil algler) üretimi üzerine çalışmalar yaklaşık aynı zamanda Hindistanda başlamıştır (Venkatamaran 1986). Böylece kısa bir sürede biyoteknolojide mikroalg endüstrisi büyük ölçüde gelişmiştir.

Mikroalg Üretim Sistemleri

Ticari mikroalg üretiminin başarısı birçok etmene dayanmaktadır; bunlardan biri büyük çaplı alg kültür sistemlerinde az harcamayla verimli ürün elde etme yolunun geliştirilmesidir. Ancak bu gelişim yavaş bir süreçte devam etmektedir. Büyük ölçekli kültür sistemlerinde ışığın etkin kullanımı, sıcaklık, alg kültüründe hidrodinamik dengeyi sağlama, kültürün devamını sağlayabilme gibi ana hususların kıyaslanması gerekmektedir. Sonuçta ekonomik bir sonuca ulaşmak temel hedeftir.

Her alg türü en ideal gelişimi kendine özgü spesifik koşulların sağlandığı kültür ortamlarında gösterir. Buna göre, *Spirulina* yüksek pH ve bikarbonat yoğunluğunda, *Chlorella* nutrientçe zengin ortamda, *Dunaliella salina* ise çok yüksek tuzlulukta en iyi büyümeyi göstermektedir (Soong 1980, Belay 1997).

Günümüzde ticari mikroalg üretiminde, genellikle insan gıdası olarak değerlendirilen ve tıp-eczacılık alanında kullanılan *Chlorella* ve *Spirulina* gibi mikroalgler tercih edilmekte ve yine mikroalglerden *Dunaliella salina* β-caroteni için, *Hematococcus pluvialis* astaksantin pigmenti için ve bunun gibi birçok mikroalg türleri 30 yıldan fazla süredir varılmaktadır.

Dış mekânlarda mikroalg üretim sistemleri, doğal gölet, havuzlar ve tanklar (konteynırlar) olmak üzeredir. Bununla birlikte tübüler fotobiyoreaktörler ve düz-levha fotobiyoreaktörleri de mikroalg üretiminde yeni tasarımları oluşturmaktadır.

İç mekânlardaki mikroalg üretim sistemleri, iç mekânlarda küçük ölçekli torbalarda mikroalg üretim sistemleri, kapalı ortam koşullarındaki büyük ölçekli "Big Bag" sistemler, tübüler fotobiyoreaktörler, düz-levha fotobiyoreaktörleri olarak bilinmektedir.

Dış mekânlarda tasarlanmış ticari mikroalg kültür

sistemleri büyük ölçekli sistemlerden oluşur (Burlew 1953). Büyük ölçekli üretimlerde genelde tercih edilen üretim sistemlerinden biri de açık alanlardaki doğal gölet ve havuzlardır.

Dış mekânlardaki mikroalg üretim sistemlerinin iç mekândaki sistemlere göre en önemli ve en belirgin farkı, alg kültürlerinin doğrudan çevre etkilerine maruz bırakılmasıdır. Günümüzde mikroalgleri yetiştirmek için kullanılan kültür sistemleri genel olarak yeterli gelişmemiştir. Mesela, *Dunaliella salina*, *Chlorella* ve *Spirulina* hiçbir yapay karışım olmaksızın üstü açık, sığ ve geniş dairesel havuzlarda karışımı sağlanarak üretimi yapılabilmektedir. Güney Japonya'da dairesel üretim havuzlarında *Chlorella*'nın üretimi, Hindistan'da *Spirulina*'nın büyütme havuz modelinde üretimi yapılabilmektedir. Teknik karmaşıklığı göz önünde bulundurulursa, açık havuz sistemleri büyük ölçüde çeşitlilik gösterebilir. Bunun nedeni ise bu sistemlerin ekonomik olması; iç mekân kültür sistemlerinin ise daha fazla teknolojik bilgiyi alt yapıyı gerektirmesi ve bu nedenle daha pahalı oluşudur. Buna rağmen, sadece az sayıda alg türü dış mekân sistemlerinde başarılı bir şekilde yetiştirilebilmektedir. Ayrıca, kültürün kirlenmesiyle kontamine olması mümkündür.

Fakat mikroalg yetiştiriciliği için yine de son dönemdeki kapalı havuz sistemlerinden çok daha karmaşık değildir. Asya'da ve Ukrayna'da yaygın olarak görülen dairesel havuz tasarımları kapalı havuz sistemleri ile aynıdır. Kayda değer bir biçimde buharlaşmayla meydana gelen kayıplar hem CO₂'in atmosfere yayımını, hem de sürekli buharlaşma ve kirlenme tehlikesi açık havuz sistemlerinin başka dezavantajlarıdır. Bir de gereken büyük alan haffa alınmamalıdır. Bu prensibin uygulanışından başlıca dezavantajı yüksek tabaka yoğunluğundaki kısıtlamanın görülmesidir.

Şeffaf Kaplarda ya da Tanklarda Mikroalg Üretimi

İç mekânlarda akuakültür amaçlı ve küçük ölçekli mikroalg üretimi, genelde hacimce yaklaşık 1000L'den küçük plastik torbalarda ya da 20-40L'lik kaplarda kesikli üretim yöntemiyle uygulanır.

Akuakültürde kullanılan diğer sistemler, geniş torbalar ve polyester tanklardır. Dış mekânlarda büyük ölçekli olarak tasarlanmış polyester tanklardan oluşan sistemlerde doğal güneş ışığından faydalanılarak mikroalg üretimi yapılmaktadır. Bu sistemlerin dezavantajı, üretim performansı garanti altında olmadığı gibi, üretimi önceden belirleme şansı yoktur. Yine küçük ölçekli iç mekânlarda şeffaf kaplarda mikro alg üretimi yapılabilmektedir. Etkin iş gücü ve üretim istenilen kalitededir (Kargın 2002).

Plastik Torbalarda Mikroalg Üretimi

Bu sistemlerde algler, starter kültürle doldurulmuş plastik torbalarda (1000>) üretilir. Kültür kesikli yöntem ile iç veya dış mekânlarda gerçekleştirilir. Bu sistemlerinde bazı dezavantajları, üretimin kesikli olması etkin işçiliği gerektirir ve sistemde hacim göreceli olarak artırılmalıdır. Sistemin büyük ölçekte oluşu ışıktan yararlanmayı kısıtlar. Bu durumda üretim arzu edilen kalitede olmayabilir (Kargın 2002).

En yaygın kullanılan büyük çaplı sistem (1000<) "big bag" sistemidir (Baynes ve diğ. 1979, Watson 1979). Bu

sistemlerde yaklaşık 0.5m çapında büyük steril plastik torbalar kullanılmaktadır. Bu sistemlerde genellikle yarı sürekli üretim yöntemi kullanılmaktadır. Cohen ve Arad (1989) tarafından değişik bir tasarım yapılarak daha dar torbalarda da denenmiş olmakla birlikte; bu sistem ticari üretim amacıyla kullanılmamıştır.

“Big bag” sisteminin ana sorunu, büyük çaplı torbalarda yapay ışık sınırlaması sonucu düşük fotosentez oluşumudur, sıcaklığın kontrol altında tutulabilmesi için sistem iç mekanda oluşturulmalıdır. Bu sistemde iş gücüne daha fazla ihtiyaç duyulmaktadır, kültürler genelde büyük ölçekli olduğundan yetersiz bir karışım söz konusudur. Bütün bu hususlar alg üretiminde maliyeti artırır unsurlardır (Fulks ve Main 1991).

Tübüler Fotobiyoreaktörler

Fototrofik mikroorganizmaların üretimi için kullanılan teknik tasarımlardan oluşan sistemler fotobiyoreaktörler olarak adlandırılır. Bu sistemlerin çeşitli tasarımları dikkate alınarak üretim verimliliği ve ekonomik olarak uygulanabilirliği araştırılmalıdır. Son zamanlara kadar açık havuz sistemleri mikroalg üretimi için en çok kullanılan sistemlerdi, ancak eczacılık ve kozmetik alanındaki uygulamalarda mikroalgden yüksek kalitede ürünlerin hazırlanmasına yönelik tasarımlar sadece kapalı fotobiyoreaktörlerle uygulanabilir.

Dış mekândaki fotobiyoreaktör, mikroalg üretimi için tasarlanmış, güneş ışığının yeterli olduğu dış mekânlarda, saydam silindirik borular içinde algin bulunduğu, sürekli dolaşım sistemine dayanan bir modeldir (Acien Fernandez ve diğ. 1998).

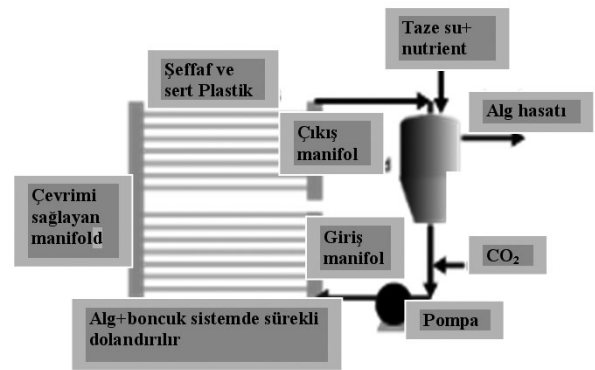
Ticari ölçekli mikroalg üretimi için genelde üretim çiftlikleri tübüler fotobiyoreaktörleri tercih etmektedir. Bunun nedenleri ise, üretimin kontrol altında tutulabilmesi, üretimi önceden tahmin edebilme, yer-işçilik bakımından ekonomik yararlar sağlamadır. Tübüler fotobiyoreaktörde şeffaf boru biçimindeki reaktörler büyük ölçekli olarak geliştirilebilir. Biyoreaktörler farklı şekillerde tasarlanarak yani boru şeklindeki şeffaf tüpler uzunlamasına sayıları artırılarak daha büyük ve kapsamlı sistemler inşa edilebilir. Diğer önemli husus ise, alglerin biyoreaktör içerisinde pompa yardımıyla dolaşımını temin etmektir. Biyoreaktörde dolaşımı temin etmek için en basit ve en ucuz pompa diyafram pompadır. Ancak diyafram pompaların büyük ve gelişmiş yapılı olanları pahalıdır. Algler özellikle sert hücre yapısına sahip *Nannochloropsis* sp., *Chlorella* sp. gibi türler ile *Tetraselmis*, *Isochrysis* gibi disk şeklinde hücre yapısı olan alg türleri için peristaltik pompalar daha uygunken, bu mikroalg türlerinin fotobiyoreaktörde istenilen yoğunlukta üretimi de sağlanabilmektedir. Biyo Fence adı verilen ticari üretim sisteminde de çok sert ya da esnek yapılı şeffaf plastik boru ya da tüpler kullanılmaktadır.

Tüpler, dikey ya da yatay bir şekilde düzenlenerek kapalı ya da dış alanlarda belli bir açıyla inşa edilebilir. Şeffaf tüplerin ya da plastik tüplerin yüzeyine biriken alglerin temizlenmesinde özel patentli boncuklar kullanılır. Bu boncuklar alg ile birlikte sistemde dolaştırılarak sistemin temizliği sağlanabilir. Genelde bu tür temizleme uzun dönemli çalışan sistemler için gerekli olmaktadır. Sistem büyük ölçekli

düşünüldüğünde tüpler büyük çaplı ve uzunlamasına tasarlanarak sıvı akışının daha rahat olabilmesi sağlanır, büyük boyutlu ve daha pahalı bir pompaya ihtiyaç duyulur. Sistemde boyut ve hacmin artmasına paralel olarak da ışık, CO₂ tüketim oranı ve O₂'nin ortamda birikimi (satürasyon) söz konusu olmaktadır. Bu durum, tüplerin üst kısmında oksijen üretiminden dolayı köpüklenme ve hücrelerin fotooksidasyon nedeniyle ağarması şeklinde kendini belli eder (Bio. Fence Products Page, [http:// www. biosynthesis. co.uk / products.htm](http://www.biosynthesis.co.uk/products.htm), 2.Agus.2004).

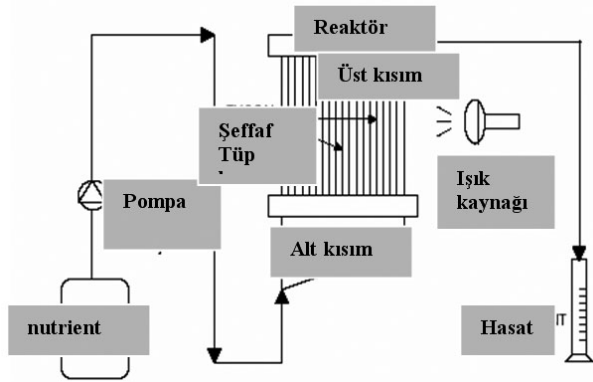
Tamamıyla kapalı sistem olarak tasarlanan tüpüler fotobiyoreaktörler, farklı şekillerde oluşturulmuş, çeşitli büyüklük ve uzunluktaki şeffaf tüplerden meydana gelir (Tredici 1999) ve yoğun mikroalg üretimi için uygun bir potansiyel oluşturur (Gudin ve Chaumont 1983, Torzillo ve diğ. 1986). Kapalı sistemleri sürdürmek ve yapılandırmak şüphesiz çok pahalıdır. Ancak bu sistemler kesin olarak tek bir tür için uygulanabilir (Molina ve diğ. 1999). Biyoreaktörleri farklı sayılarda uygulanabilir, ancak transparan tüp borular esnek ya da sert olarak tercih edilebilir. Her ikisinde de boruların eklenme kısımlarında U şeklinde bağlantılar (manifold) bulunur ([www.biosynthesis. couk/products.htm](http://www.biosynthesis.co.uk/products.htm), 2.Agus.2004).

Kapalı reaktörlerin mikroalg üretiminde kontaminasyonu önlemek ve yüksek yoğunluktaki ışığın etkin kullanımı ile yüksek üretim sağlamak, ısı kontrolü ve dış mekanda tasarlanan kapalı biyoreaktörlerde güneş ışığının kullanılabilme özelliği gibi birçok avantajı vardır. Kirlilik riskinin önlenmesi çok daha geniş türlerin üretilebileceği ve dış ortamda da biyoreaktörlerin kullanılabilmesi anlamına gelmektedir. Kapalı fotobiyoreaktörlerde kültür ortamını kontrol etmek kolaylaşmaktadır. Böylece elde edilen ürün istenilen kalite ve verimlilikte olabilmektedir (Chrismadha ve Borowitzka 1994).

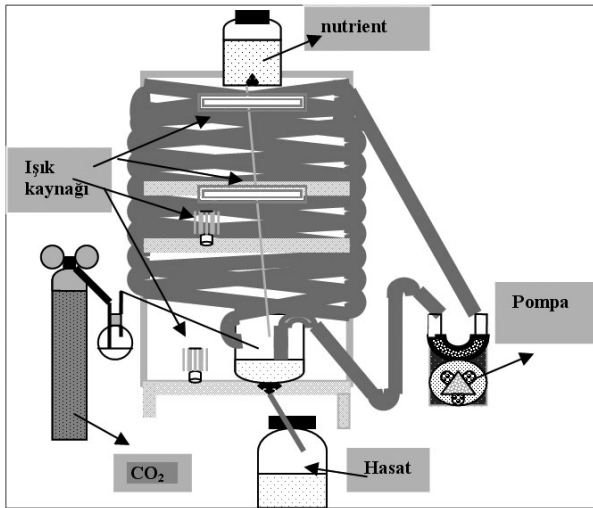


Şekil 1. Tübüler kapalı fotobiyoreaktör tasarımı Bio.Fence Products Page (<http://www.biosynthesis.co.uk/products.htm>, 2.Agus.2004).

Park ve Lee (2000)'de yaptıkları çalışmalarında iç mekanda fotobiyoreaktörde mikroalg üretimi için flaş ışığın biyomas verimliliğine etkisini araştırmışlardır. Fotobiyoreaktörde, flaş ışığın sürekli ışıkla aydınlatmaya göre biyomas verimliliğini ve fotosentez oranını arttırdığını bildirmişlerdir.



Şekil 2. Laboratuvar Koşullarında Tübüler fotobiyoreaktörün şematik çizimi (Park ve Lee 2000).



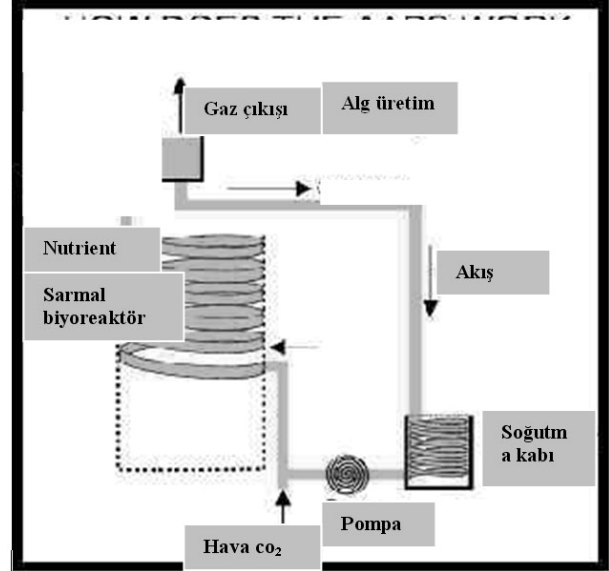
Şekil 3. Laboratuvar Koşullarında Sarmal Fotobiyoreaktör (Kargın 2004)

Deniz balıklarının larva yetiştiriciliğinde canlı yem kaynağı olarak kullanılan Rotifer ve *Artemia*'nın besinini oluşturan tek hücreli yeşil alglerden *Tetraselmis suecica*'nın tübüler sistemde sürekli yöntemde üretiminin gerçekleştirilmesi ve büyüme parametrelerinin belirlenmesi araştırılmıştır. *Tetraselmis suecica*'nın kültüründe son dönemde gündeme gelen tübüler sürekli kültür sistemi ülkemiz koşullarına uyarlanarak laboratuvar koşullarında küçük ölçekte uygulanmıştır. Proje kapsamında geliştirilen model ve yetiştirilen alg türünün büyüme parametrelerine ilişkin olarak elde edilen bulgular da bilimsel katkı sağlamaktadır (Kargın 2004).

Düz-levha Tip Fotobiyoreaktörler

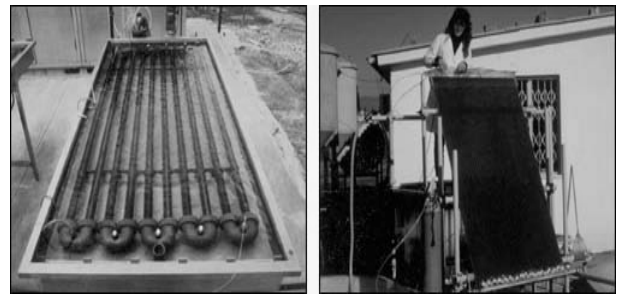
Levha şeklindeki fotobiyoreaktörlerin başlıca ilkesi veya ince çaplı boru fotobiyoreaktör tasarımı temel ilke, yüzey genişliğini artırarak ışığın etkin kullanımını sağlamaktır. Borulu fotobiyoreaktörlerin içindeki çap önemli bir biçimde azaltılmış ve düz-levha şeklindeki biçimler tercih edilmiştir. Borulu ya da çubuk reaktör tasarımları tamamen cam ve plastik borulardan oluşmuştur. 1980'lerin sonuna doğru

yoğunluk kazanan kapalı fotobiyoreaktörlerin gelişimi önem kazanarak, borulu sistemlerin levha tip sistemle benzer potansiyele sahip olduğu, özellikle yatay yönlendirilen boruların dikey durumda uyarlanması da önemlidir.



Şekil 4. Laboratuvar Koşullarında Soğutma Sistemli Sarmal Fotobiyoreaktör Tasarımı (<http://www.addavita.demon.co.uk/howthe.htm>)

Düz levha reaktörler Pulz (1994), Tredici ve Zitelli (1997) ve tübüler fotobiyoreaktörler iki temel tasarımı oluşturur. Bütün bu tasarımların temel ilkesi ışık yönünü azaltmak böylelikle her hücreye düşen ışık miktarını arttırmaktır. Gaz değişimini arttırmak ve hücrelere uygun ışığı sağlamaktır. Bu reaktörlerde karışım en iyi düzeyde ve reaktördeki uygun kültür kalınlığı 2 ile 4 cm arasındır.



Şekil 5. Dış ortamda sürekli alg üretimi için fotobiyoreaktör (Tomaselli 1993) *Spirulina*'nın dış ortamda üretimi düz levha reaktör tasarımı (Tredici 1999)

"Biocoil" Mikroalg Üretim Sistemi

"Biocoil", kuleyi saran küçük çaplı (2,4 – 5 cm arası) şeffaf plastik borudan oluşturulmuş helozoik tüpüler fotobiyoreaktördür. Santüfaj, diyafram ya da peristaltik pompalar ya da hava kaldırımı olabilen pompalama sisteminden yararlanır. Yarı sürekli kültürde 4 aydan fazla bir zamanda 700 L' den fazla hacme sahip "biocoil" sistemde *Spirulina*, *Tetraselmis* sp., *Isochrysis galbana*, *Phaeodactylum tricorutum* ve *Chaetoceros* sp., gibi büyük ölçüde deniz

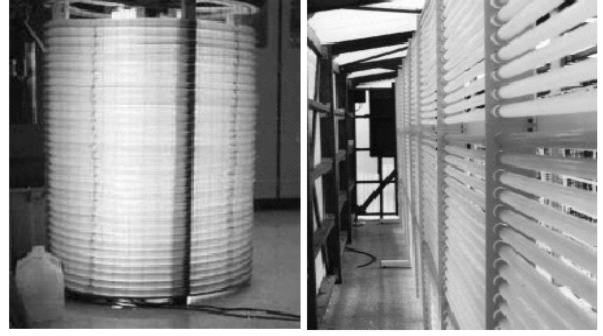
mikroalgi türleri yetiştirilebilir.

Biocoil tasarımı eşit karışım sağlamakta ve alglerin tüplerin iç yüzeylerine yapışmasını en aza indirmektedir. Ayrıca biocoil sistemi kolaylıkla taşınabilmektedir, böylece iş gücü en aza indirgeyerek ve güvenilirliği artmaktadır. Üretim sürecini otomatikleştirir. Bütün alg türleri için bu sistem uygun değildir. Bazıları özellikle hassas türler sirkülasyon sisteminden zarar görmektedir ve diğer bazı türler ise şeffaf tüplerin iç yüzeyine yapışarak alg üretimini olumsuz etkileyebilirler.

İç mekânlarda tasarlanmış "Biocoil" sistemlerde *Chlorella* sp. alg türü kolayca kültüre edilebilir. Ayrıca *Chlorella* sp. iyi bir pH dengeleyicisidir. "Biocoil" sistem, Biyotekna Şirketinden İngiliz Robinson tarafından geliştirilmiştir. "Biocoil" sistemler algin pompa yardımıyla çevrildiği, algin büyüme parametrelerinin kolayca kontrol edilebildiği sistemlerdir. Sistemde bu amaçla kullanılan hava pompası, algi iter ve "biocoil" içinde alg kendi cazibesi ile dolunur. Sistemde alg maksimum düzeyde arttığında; ışık sınırlaması nedeniyle fotosentez yavaşlayabilir. "Biocoil" sistemler dış mekânlarda güneş ışığından faydalanarak ya da iç mekânlarda yapay ışık kaynağından yararlanarak yürütülebilir. Işık belli bir açıyla verilir ve böylece alg hücreleri ışıktan daha iyi yararlanır, daha kolay fotosentez meydana gelir. "Biocoil" sistemde tübüler fotobiyoreaktörde ya da düzlevha tip reaktörlerde temel prensip; organik bileşik, suyun, karbondioksit ve güneş ışığının ya da yapay ışık kaynağının olduğu fotobiyoreaktörde hafif çevrim sistemine dayalı olmasıdır. "Biocoil" sistemlere yine algin toplanabileceği bir tankın ya da kabın ilave edilmesi uygun olabilir (Kennedy 1998)

Sonuç ve Öneriler

Son yıllarda mikroalg üretiminde fotobiyoreaktör tasarım ve çalışmalarında birçok gelişmeler olmuştur. Bu sistemlerin yakın gelecekte ticari açıdan önem arz edeceği görülmektedir. 1990'dan beri fotobiyoreaktör kapalı ya da yarı-kapalı farklı tasarımlarına dayanan sistemleri araştırılmış ve test edilmiştir. Son gelişmeler boru şeklinde görülen fotobiyoreaktör ya da ana planı ışığı geniş bir alana yaymak olan levha tip fotobiyoreaktörlerdir. Yine bugünlerde "biocoil" gelecek vaat eden bir tasarım olarak görünmektedir (Robinson ve Morrison 1992). Bu sistemler, sürekli sistemde çalışmaya uygundur. Sürekli sistemle çalıştırılan ve büyüme parametrelerinin etkin kontrolüne bağlı olarak uygun kaliteli üretim ve yüksek çalışma performansı yüksek biyomas ile sonuçlandığından, toplam maliyet düşmekte ve daha küçük alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Şimdiki hedef ise, bu sistemlerin inşaa ücretlerini azaltmak ve alg üretimini daha da ekonomik hale getirmek olmalıdır.



Şekil 6. Kapalı Ortamda "BioCoil" Sistem (BioFence)



Şekil 7. "BioCoil" sistem (www.scieng.murdoch.edu.au/centres/algae/BEAM-Net/BEAM-App4a.htm, 27.05.05)

Kaynakça

- Acien Fernandez, F. G., Garcia Camacho, F., Sanchez Perez, J. A., Fernandez Sevilla, J. M., & Molina Grima, 1998. Modelling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures: Effects of dilution rate, tube diameter and solar irradiance. *Biotechnology and Bioengineering*, 58; 605-616.
- Baynes, S. M., Emerson, L., Scott, A. P., (1979). Production of algae for use in the rearing of larval fish. *Fisheries Research Technical Report* 53; 13-18.
- Beijerinck, M. W., 1890. Kulturversuche mit Zoochloren, Lichenengonidien und anderen niederen Algen. *Bot. Ztg.* 48; 725-785.
- Belay, A., 1997. Mass culture of *Spirulina* outdoors. The Earthrise Farms experience. In: Vonshak, A. (eds.), *Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, cell-biology and biotechnology*. Taylor and Francis, London; 131-158.
- Borowitzka M.A., 1992. Algal biotechnology products and processes: matching science and economics. *J Appl Phycol* 4; 267-279
- Burlew, J. S. (eds.), 1953. *Algae Culture. From Laboratory to Pilot Plant*. Carnegie Institution of Washington, Washington, DC
- Borowitzka LJ (eds) (1988) *Micro-algal biotechnology*. Cambridge University Press, Cambridge
- Chrimadha, T., Borowitzka, M. A., 1994. Effect of cell density and irradiance on growth, proximate composition and eicosapentaenoic acid production of *Phaeodactylum tricornutum* grown in a tubular photobioreactor. *J. Appl. Phycol.* 6; 67-74.
- Cohen, E., Arad, S., 1989. A closed system for outdoor cultivation of *Porphyridium*. *Biomass* 18; 59-67.
- Durand Chastel, H., 1980. Production and use of *Spirulina* in Mexico. In: Shelef, G., Soeder, C. J. (Eds.), *Algae Biomass*. Elsevier/North Holland Biomedical Press, Amsterdam; 51-64.
- Fulks, W., Main, K. L., 1991. The design and operation of commercial-scale

- live feeds production systems. In: Fulks, W., Main, K. L. (eds.), Rotifer and Microalgae Culture Systems. The Oceanic Institute, Honolulu, H. I.; 3-52.
- Gudin, C., Chaumont, D. 1983. Solar biotechnology study and development of tubular solar receptors for controlled production of photosynthetic cellular biomass. In W. Palz, & D. Pirwitz (eds.), Proceedings of the Workshop and E. C. Contractor's meeting in Capri (pp. 184-193). Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Kargin, H., 2002. Mikroalg- Rotifer Kültür Sistemleri ve Tasarımları, Yardımcı ders kitabı, ME. Ü. Yayınları No. 5, Su Ürünleri Fakültesi Yayınları No. 3; ISBN 975-6900-08-3; 15-16.
- Kargin, H., 2004. Tübüler Sistemde *Tetraselmis suecica* Alg Türünün Büyüme Hızı ve Ürün Verimliliği. ME.Ü. BAP SÜF TBB (HK) 2001-3 no'lu proje.
- Kawaguchi, K., 1980. Microalgae production systems in Asia. In: Shelef, G., Soeder, C. J. (Eds.), Algae Biomass Production and Use. Elsevier/North Holland Biomedical Pres, Amsterdam; 25-33.
- Kennedy, C. A., 1998. In Home Photosynthetic Bioreactor. Advanced Biology Home Page Webmaster.
- Lee, Y. K., 1997. Commercial production of microalgae in the Asia-Pacific rim. J. Appl. Phycol. 9; 403-411.
- Molina Grima, E. 1999. Microalgae, mass culture methods. In M. C. Flickinger, & S. W. Drew (eds.), Encyclopedia of bioprocess technology: Fermentation, biocatalysis and bioseparation, New York: Wiley, vol. 3; 1753-1769.
- Park, K.-H. and C.-G. Lee, 2000. Optimization of algal photobioreactors using flashing lights. Biotechnol. Bioproc- ess Eng. 5; 186-190.
- Pulz, O., 1994. Open-air and semi-closed cultivation systems for the mass cultivation of microalgae. In: Phang, S. M., Lee, K., Borowitzka, M. A., Whitton, B. (eds.), Algal Biotechnology in the Asia- Pasific Region. Institute of Advanced Studies, University of Malaya, Kuala Lumpur; 113-117.
- Pulz, O., 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. IGV Institute for Cereal Processing, Arthur- Scheunert-Allee 40/41, 14558 Bergholz-Rehbrücke, Germany.
- Robinson and Marrison, 1992. Alga *Chlorella Vulgaris* coltivazione, estrazione e purificazione di una glicoproteina ad azione antitumorale , Anno Accademico 2001- 02, pp 7-15.
- Soong, P., 1980. Production and development of *Chlorella* and *Spirulina* in Taiwan. In: Shelef, G., Soeder, C. J. (Eds.), Algae Biomass. Elsevier/North Holland Biomedical Pres, Amsterdam; 97-113.
- Tredici, M. R., Zitelli, G. C., 1997. Cultivation of *Spirulina* (*Arthrospira*) *platensis* in flat plate reactors. In: Vonshak, A. (ed.), *Spirulina platensis* (*Arthrospira*): Physiology, cell-biology and biotechnology. Taylor and Francis, London; 117-130.
- Tredici, M.r., 1999. Bioreactors, photo. In: Flickinger M. C., Drew S.w., (Eds) Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis and bioseparation, vol 1. Wiley, New York; 395-419.
- Tsukada, O., Kawahara, T., Miyachi, S., 1977. Mass culture of *Chlorella* in Asian countries. In: Mitsui, A., Miyachi, S., San Pietro, A., Tamura, S. (Eds.), Biological Solar Energy Conversion. Academic Pres, New York; 363-365.
- Tsoglin and Gabel 2000. The technology of production of biomass labeled with stable isotopes. Abstracts of the 4th European workshop on biotechnology of microalgae. Bergholz-Rehbrücke, Germany.
- Torzillo, G., Pushparaj, B., Boci, F., Balloni, W., Materassi, R., & Florenzano, G. 1986. Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors. Biomass, 11; 61-64.
- Tomaselli, L, Giovannetti, L., Torzillo, G., 1993. Physiology of stres response in *Spirulina*, *Spirulina*, Algae of Life. In: Doumenge, F.; Durand- Chastel, H. & Toulemont, A. (eds). Spiruline Algue de Vie. Bulletin de L'Institut Océanographique, Monaco, n.12, p. 65-75, 1993.
- Venkatamaran, L. V., 1986. Blue-green algae as biofertilizer. In: Richmond, A. (Ed.), CRC Handbook of Microalgal Mass Culture. CRC Pres, Boca Raton, FL; 455-471.
- Warburg, O., 1919. Über die Geschwindigkeit der Kohlensäurezusammensetzung in lebenden Zellen. Biochemische Zeitschrift 100; 230-270.
- Watson, A. S., 1979. Aquaculture and Algae Culture. Process and Production. Noyes Data Corporation, N. J.
- <http://www.biosynthesis.co.uk/products.htm>, 2.Agus.2004
- <http://www.addavita.demon.co.uk/howthe.htm>, 24.05.2005